

運動の想像を脳波から検出するBCIにおけるユーザ 訓練に関する研究

著者	I PUTU SUSILA
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4203号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61963

	い ぶ と す し ら
氏 名	I PUTU SUSILA
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成21年9月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	運動の想像を脳波から検出する BCI におけるユーザ訓練 に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 吉信 達夫
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 吉信 達夫 東北大学教授 松木 英敏 東北大学教授 中尾 光之

論 文 内 容 要 旨

我々は、移動、機器の操作、コミュニケーションなどのあらゆる局面で運動機能に頼って生活をしている。運動は脳からの電気信号が脊髄、末梢神経を介し、それぞれの筋に送られることで実現される。しかし、交通事故などによる脊髄損傷、あるいは脳卒中などによって中枢神経系に障害を受けることで、脳からの電気信号の伝達経路が断たれると、四肢や体幹に運動機能の麻痺が生じる。このような障害がある患者に、会話や手足の動作などによらないコミュニケーション手段を提供する技術としてブレインコンピュータインターフェース (BCI: brain-computer interface) が注目されている。BCI は、課題を行っているユーザの脳活動を計測し、得られた信号に解析処理を施すことでユーザの意図を検出するものである。

運動のイメージを行うことによって生じる脳波を用いる BCI は、違和感のない操作が可能であるために多くの研究が行われている。しかし、運動イメージによって生じる脳波の振幅は小さい。また、観測される脳波の再現性が低い場合もある。そのため、一般に運動イメージを用いた BCI での検出精度は高くなかった。計測した脳波から生成した情報をユーザにオンラインでフィードバック提示しながら運動イメージを行う訓練をユーザに対して行うことにより、運動イメージに伴う脳波の振幅や再現性が向上することが示されている。しかし、フィードバック訓練の効果を具体的に定量評価した結果や、有効なフィードバック訓練のための方法論はまだ示されていない。

また、運動イメージを検出する BCI に関するこれまでの研究では、システム側がユーザにタイミングを提示し、それに同期してイメージを行うことをユーザに求めるものが多い。しかし、非同期で動作する (タイミングをシステムが指定するのではなくユーザが任意のタイミングで操作できる) BCI システムを実現するためには、課題の種類のみでなく、課題遂行の有無を検出する必要があり、難易度がより高くなる。このような運動のイメージの有無の判別を行うための情報検出アルゴリズムの検討は、これまで十分には行われてこなかった。

一方、脳波を用いた BCI システムを実現するためには、脳波をリアルタイムで AD 変換し、それをコンピュー

タに収録し、同時に計測データから情報検出を行うための解析処理を行い、その結果をシステム外に出力しなければならない。このような高度なリアルタイムシステムを実現するためにはコンピュータのハードウェアとソフトウェアに関する十分な知識と技能が必要になり、そのため BCI システムの構築に長い時間を要していた。BCI 研究の効率化やシステムの開発期間の短縮のために、BCI システム構築を支援するためのツールの開発が待たれていた。

本研究は、脳波から運動イメージを検出する BCI システムの正答率の向上を目的とし、ユーザに対するオンラインフィードバック訓練の効果の評価と、計測された脳波からの情報検出手法の検討を行った。また、高度なリアルタイム処理が必要な BCI システムの構築のための汎用プラットフォームを開発した。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全文 6 章よりなる。

第 1 章では序論であり、本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では、脳活動に関する生理学的知見と計測原理、BCI の原理と本研究で用いられる特徴抽出・パターン分類の手法についてまとめた。

第 3 章では、脳波および近赤外分光法 (NIRS: near-infrared spectroscopy) によって計測された脳活動信号をリアルタイムで解析した結果をユーザにフィードバックしながら運動イメージの課題の遂行を求めるオンラインフィードバック訓練実験を実施し、その効果を評価した結果を示した。まず、脳波の特定周波数帯域の強度をオンラインでフィードバックする訓練を 4 名の被験者に対して 30~50 日間にわたって行った。その結果、運動イメージの実施によってフィードバックに用いた周波数帯域における脳波の強度の増加が 4 名中 2 名で顕著になることが示され、それに伴いコマンド検出成績も向上することが示された。これは、フィードバック訓練によって脳活動に変化が生じることを示したものである。

次いで、NIRS で計測した脳血流変化の信号（酸化ヘモグロビン濃度の変化）を用いたフィードバック訓練を 5 名の被験者に対して 5 日間にわたって行った。フィードバック訓練が脳活動の変化に及ぼす効果を NIRS、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional magnetic resonance imaging) および多チャネル脳波のマルチモーダル計測により評価した。その結果、2 名の被験者では NIRS で計測した脳血流変化の信号の S/N 比が訓練によって向上した。この 2 名を含む 3 名の被験者においては、運動イメージ中の脳血流変化の総量を評価するために算出した積分値が訓練に伴って向上した。また、fMRI 計測によって、この 3 名の被験者では、運動イメージに伴って賦活される脳領域が訓練によって補足運動野、運動野、および小脳において限局的となることが示された。さらに、補足運動野および手足に関連する領域において関心領域 (VOI: volume of interest) を設けて、BOLD (blood oxygenation level-dependent) 信号の変化を評価した。その結果、2 名の被験者については、訓練後に BOLD 信号のピーク値および積分値が小さくなった。一方、これらの被験者からは、運動イメージに伴う脳波の帯域強度の有意な増加・減少はみられなかった。

第4章では、脳波の帯域強度を特徴ベクトルとし、それをパターン分類することによって課題遂行の有無やその種類の判別を行う際の解析処理方法と検出精度の比較検討を行った。1チャンネルの脳波から運動イメージの有無を検出するために、計測された脳波からFFT (fast Fourier transform), AR モデル (auto-regressive model) およびフィルタバンクを用いて算出した帯域強度を特徴ベクトルとし、線形判別分析 (LDA: linear discriminant analysis) により判別精度を評価した。FFT および AR モデルを用いた場合は同程度の成績が得られたが、フィルタバンクを用いた場合は判別精度が劣った。また、主成分分析 (PCA: principal component analysis) を用いて特徴ベクトルの次元削減を行うことで特徴選択をしたところ、次元数を35次元から7~8次元に削減しても判別成績を低下させることはなかった。線形判別分析とサポートベクターマシーン (SVM: support vector machine) をパターン分類に用いた際の成績を比較検討したところ、サポートベクターマシーンを用いた方が成績は若干良好であったが、計算時間を考慮すると、線形判別分析を用いても実用上は十分であることが示された。

次いで、左手、右手、両足の動作イメージを被験者に課す実験において、運動イメージの有無やその種類の検出成績を評価した。計測した脳波の帯域強度をARモデルによって算出し、主成分分析により次元削減を行った後、マハラノビス距離を用いた多クラス判別分析によって帯域強度のパターン分類を行った。本手法を32チャンネルの単極誘導で計測した脳波データ (被験者1名, 3日分のデータ) に対して適用した結果、左手、右手、両足の運動イメージと安静時の4クラスの正答率は、次元を150に削減した場合53 ~ 70 % であることが示された。

第5章では、オンラインBCIシステム構築のために開発した汎用プラットフォームxBCIについて述べた。本プラットフォームはコンポーネントと呼ばれる特定の処理 (データ収録, フーリエ変換など) を行うための機能モジュールで構成されており、これらを組み合わせることでシステムを構築するものである。その特徴としてGUI (graphical user interface) ベースのダイアグラムエディタでコンポーネントを配置し結線することで容易にシステムを構築できること、拡張が容易であること、マルチスレッドによる並列処理の実現, Windows, Linuxなどの複数のOS上で動作することやオープンソースであることなどが挙げられる。本プラットフォームのコンポーネントをプラグインあるいはスクリプト言語を用いて追加することで、より多くのシステムを実現できる。

オンラインフィードバック訓練システムおよび定常的視覚誘発電位 (SSVEP: steady-state visual evoked potential) を用いたBCIシステムを、本プラットフォーム上で実際に構築した。オンラインフィードバック訓練システムでは、運動イメージに伴う脳波の帯域強度の変化からフィードバック情報を生成し、帯域強度に比例した長さの白いバーとしてLCDモニター上にリアルタイムで表示し、ユーザに提示した。また、SSVEPを用いたBCIシステムでは、ユーザは異なる周波数で点滅するLEDのいずれかを注視し、計測された脳波の周波数成分から注視するLEDを特定した。検出信号に基づきBluetoothによりロボットの操作を行うことが可能であることが示された。これらのBCIシステムの動作確認により、本プラットフォームの有用性を示した。

第6章は結論である。

本研究で得られた成果により、運動イメージを用いて外部機器を制御する BCI システムのユーザ適用性を向上できると考えられる。課題遂行の有無の検出および多クラス課題におけるコマンド検出手法の検討の結果をもとに非同期で動作する BCI システムの実現が可能になると思われる。さらに、汎用プラットフォームを用いることによって BCI システムの短時間での開発が可能になった。訓練およびパターン認識手法の性能向上によってコマンド検出成績が向上すれば、BCI システムを日常生活環境に広く適用することが可能になると考えられる。

今後は、より効率的なユーザ訓練を行うための方法論の検討、脳活動信号からの特徴抽出や特徴選択による検出成績の向上を目指し、運動イメージを脳活動から高い精度で検出する BCI システムの構築も目指す必要がある。

論文審査結果の要旨

四肢麻痺患者等に機器の操作やコミュニケーションの手段を提供する技術として、ユーザの脳活動を非侵襲的に計測してコマンドを検出・生成する、脳・コンピュータ間インターフェース (BCI) が注目されている。著者は、ユーザが運動の想像を行う際に生じる脳波からコマンドを検出する BCI に着目し、その検出精度向上に有効とされるユーザ訓練の効果について研究を行った。また、コマンド検出手法について検討を行い、さらに、BCI システムの構築を容易にするプラットフォームを開発した。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全文 6 章よりなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第 2 章では、脳活動に関する生理学的知見と計測原理、BCI の原理とそこで用いられる特徴抽出・パターン分類の手法についてまとめている。

第 3 章では、計測された脳活動の信号を加工してリアルタイムでユーザに提示するフィードバック訓練の効果について詳細な検討を行っている。脳波の特定帯域強度を視覚的に提示して行う訓練では、4 名中 2 名の被験者において、想像による帯域強度の増大が顕著になり、想像を行わない状態との弁別成績が向上した。近赤外分光法で計測される脳血流中の酸化ヘモグロビン濃度を視覚的に提示して行う訓練では、5 名中 3 名の被験者において、想像中の信号が増大した。機能的磁気共鳴画像法による訓練前後の脳活動の解析から、これらの被験者において補足運動野・運動野・小脳の賦活が局在化していることを見出した。これは BCI の検出精度を向上させるユーザ訓練の指針を与える重要な知見である。

第 4 章では、ユーザが自由なタイミングでコマンドを出すことができる非同期型 BCI への応用を念頭に、脳波からの特徴抽出やパターン分類の方法について詳細な検討を行っている。自己回帰モデルによるスペクトル推定と主成分分析による次元削減、サポートベクターマシンによるパターン分類により、1 チャンルの脳波計測から運動の想像の有無を判定する場合、真陽性率 70%、偽陽性率 10% 程度の成績が得られた。また、右手・左手・両足の各部位の運動を想像する 3 状態に安静状態を加えた 4 状態の識別を行う実験では、各状態を 60% 程度の正答率で検出できた。これは非同期型 BCI の実現に向けた重要な成果である。

第 5 章では、機能モジュールをエディタ上で結線することにより、各種 BCI システムを容易に構築できるプラットフォームを開発し、このプラットフォーム上で構築した BCI システムの性能評価を行っている。リアルタイムでのコマンド検出やフィードバックに十分な速度が得られることを確認しており、今後の BCI システムの開発に寄与する成果である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、運動の想像を脳波から検出する BCI の実用化に向けて必須の課題である検出精度の向上のため、ユーザ訓練の効果やコマンド検出手法を詳細に検討して今後の BCI システムの開発に有用な知見を示したものであり、医用電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。